مطالعه‌ی آزمایشگاهی سیستم دیوار برشی فولادی با ورق‌های پرکننده‌ی کامپوزیتی تحت بارگذاری چرخه‌ای*

«یادداشت پژوهشی»

فریبرز ناطقی الهی[۱]   مسعود خزایی پول[۲]

چکیده در این مقاله، رفتار غیرخطی دیوارهای برشی فولادی، که در آن ورق پرکننده جان با الیاف پلیمری شیشه‌ی تقویت شده‌است، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته‌است. مدل آزمایشگاهی شامل یک پانل برشی فولادی یک طبقه، با اتصال مفصلی اعضای مرزی در چهار گوشه‌ی قاب و هم‌چنین اتصال پیچی اعضای مرزی به ورق پرکننده است. در مجموع تعداد پنج آزمایش انجام شده‌است. در مدل اول آزمایشگاهی از ورق پرکننده‌ی فولادی تقویت‌نشده استفاده شده‌است، در حالی که در چهار مدل آزمایشگاهی بعدی از ورق پرکننده‌ی فولادی تقویت‌شده با الیاف پلیمری شیشه با تعداد لایه‌های تقویتی متفاوت با چیدمان‌های متفاوت استفاده شده‌است. نمونه‌های مورد بررسی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی سیکلی در امتداد قطری قرار گرفته و نتایج حاصل ارائه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از ورق پرکننده‌ی کامپوزیتی در سیستم دیوار برشی فولادی، می‌توان به مقدار قابل‌توجهی مقاومت تسلیم و نهایی، سختی اولیه و ثانویه و هم‌چنین جذب انرژی سیستم را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی مطالعه‌ی آزمایشگاهی، دیوار برشی فولادی، ورق پرکننده‌ی تقویت‌شده، الیاف پلیمری شیشه، مد شکست.

Experimental Study of Steel Plate Shear Walls with Composite Steel Infill Platesunder Cyclic Loading

F. Nateghi- Alahi   M.Khazaei-Poul

Abstract *In this paper, nonlinear behavior of composite steel plate shear wall systems, in which steel infill plate is strengthened by fiber reinforced polymer (FRP) layers, are experimentally investigated. Tests are designed to evaluate the effect of glass-FRP layers, layers number of GFRP and orientation of GFRP layers on the stiffness, shear strength, cumulative dissipated energy and other seismic parameters in the composite steel plate shear wall. Experimental models are scaled one-story steel shear panel model, with hinge type connections of boundary elements at four corners. In the first test, unstiffened steel infill plate is used for test. In the next four tests, strengthened steel infill plates are being used with different number and orientation of GFRP layers. Each test was performed under fully reversed cyclic quasi-static loading in the elastic and inelastic response zones of the specimens, in compliance with ATC-24 (1992) test protocol. The experimental results indicate that by strengthening infill steel plate yield strength, ultimate shear strength and cumulative dissipated energy can be significantly increased.*

Keywords Composite, Steel plate Shear Wall, GFRP, Fiber Orientation, Stiffness, Failure Modes.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۹/۲ و تاریخ پذیرش آن۹۲/٦/۷ می‌باشد

(۱) استاد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، پژوهشکده‌ی سازه، تهران.

(۲) نویسنده‌ی مسئول، کارشناس ارشد سازه– زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، پژوهشکده‌ی سازه، تهران.

مقدمه

دیوارهای برشی فولادی نسبت به سایر سیستم‌های مقاوم باربر جانبی دارای مزیت هایی مانند عملکرد لرزه‌ای مناسب، شکل‌پذیری بالا، جذب انرژی مناسب، سختی اولیه‌ی بالا، هزینه‌ی ساخت پایین و سرعت اجرای بالا هستند [1]. سیستم دیوار برشی فولادی به سه دسته اصلی قابل تقسیم‌بندی است.

۱- دیوار برشی فولادی تقویت‌نشده.

۲- دیوار برشی فولادی سخت‌شده.

۳- دیوار برشی فولادی کامپوزیتی.

تا پیش از دهه‌ی ۸۰ میلادی، کمانش الاستیک ورق در دیوار برشی فولادی به‌عنوان شکست سیستم در نظر گرفته می‌شد و برای جلوگیری از این مود شکست، سخت‌کننده‌های زیادی در ورق پرکننده‌ی جان برای جلوگیری از کمانش الاستیک آن استفاده می‌شد. در طراحی این نوع دیوار برشی، از کمانش الاستیک ورق جان قبل از تشکیل میدان‌های کششی جلوگیری می‌شود و مقاومت برشی کل در این نوع سیستم ترکیبی از مقاومت کمانشی جان به اضافه‌ی مقاومت ناشی از میدان‌های کششی قطری است. استفاده از سخت‌کننده‌ها به‌منظور افزایش جذب انرژی و پایدار شدن منحنی چرخه‌ای سیستم دیوار است. یکی از مشکلات استفاده از سخت‌کننده‌ها، افزایش زیاد هزینه‌های ساخت است [2].

از دهه‌ی ۸۰ میلادی به بعد، مطالعات زیاد در مورد رفتار دیوار برشی سخت‌نشده انجام شده و نتایج نشان داده‌است کمانش ورق پرکننده‌ی جان مود شکست این نوع سیستم نیست و ظرفیت و سختی این سیستم بعد از کمانش ورق جان بسیار مطلوب می‌باشد. دیوار برشی فولادی تقویت نشده، به‌عنوان یک مدل پایه در سیستم‌های دیوار برشی فولادی محسوب می‌گردد. در این نوع دیوار برشی، مقاومت کمانشی ورق پرکننده‌ی جان ناچیز است و در مراحل اولیه‌ی بارگذاری کمانش الاستیک در ورق جان رخ می‌دهد. بار جانبی در این نوع سیستم توسط میدان‌های کششی قطری که در ورق جان بعد از کمانش الاستیک تشکیل می‌شود، تحمل می‌گردد [2].در دیوار برشی فولادی کامپوزیتی، ورق جان با یک لایه‌ی بتن در یک یا هر دو طرف تقویت می‌شود. لایه‌ی بتنی می‌تواند ظرفیت دیوار برشی فولادی را با تسلیم یکنواخت ورق جان افزایش دهد. علاوه بر آن ظرفیت برشی لایه‌ی بتنی، ظرفیت برشی کل سیستم را افزایش می‌دهد. این نوع سیستم دیوار برشی در سازه‌های بلند برای کنترل تغییرمکان‌ها و افزایش سختی سیستم استفاده می‌شود.

الیاف پلیمری تقویت‌شده (FRP) دارای خصوصیات مکانیکی مانند سختی و مقاومت بالا، وزن کم، حمل آسان، مقاومت بالا در برابر خوردگی و شرایط محیطی است [3]. ورق پرکننده‌ی فولادی جان می‌تواند با لایه‌های FRP در دو طرف تقویت شود. در این نوع دیوار برشی فولادی کامپوزیتی، مانند دیوار برشی فولادی تقویت‌نشده، ورق جان دارای مقاومت کمانشی پایین است و ظرفیت برشی سیستم توسط ایجاد میدان‌های کششی قطری در ورق کامپوزیتی جان تحمل می‌شود. در این نوع خاص دیوار برشی فولادی، نقش الیاف پلیمری تقویت‌شده در افزایش مقاومت برشی پس از کمانش و سختی ثانویه سیستم قابل توجه است. این سیستم هم دارای خصوصیات مثبت دیوار برشی فولادی تقویت‌نشده مانند هزینه‌ی پایین و سرعت اجرای ساخت بالا است و هم‌چنین دارای ویژگی مثبت دیوار برشی فولادی کامپوزیتی مانند سختی و مقاومت بالا در کنترل تغییرمکان‌ها است [4].

در طی چهار دهه‌ی گذشته مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی زیادی بر روی عملکرد لرزه‌ای دیوار های برشی فولادی انجام شده که منجر به شناخت بهتر نسبت به عملکرد این نوع سیستم مقاوم جانبی شده‌است. واگنر [5] اولین محققی بود که از میدان کششی یکنواخت قطری برای محاسبه‌ی ظرفیت پانل‌هایی با بال‌های صلب و جان لاغر استفاده کرد و

بیان نمود که کمانش جان نمی‌تواند نشان‌دهنده‌ی ظرفیت نهایی سیستم باشد. براساس این ایده، محققان زیادی مدل‌های تحلیلی برای برآورد ظرفیت سیستم دیوار برشی فولادی پیشنهاد داده‌اند. توربرن و همکاران [6] روش تحلیلی «مدل نواری» را برای برآورد ظرفیت دیوارهای برشی فولادی تقویت‌نشده با جان لاغر تحت نیروی برشی توسعه و پیشنهاد دادند. تیملر و همکاران [7] روابط موجود برای به‌دست آوردن زاویه‌ی میدان‌های کششی را در ورق جان با آزمایش‌هایی اصلاح کردند. الگالی [8] به‌صورت آزمایشگاهی رفتار دیوارهای برشی فولادی را مورد بررسی قرار داد و یک مدل تحلیلی برای به‌دست آوردن رفتار این نوع سیستم‌ها ارائه داد. برمن و برونو [9] نیز یک روش تحلیل پلاستیک برای تحلیل این نوع سیستم‌ها ارائه داده‌اند. مدل نواری امروزه در آیین‌نامه‌ی کانادا (CAN/CSA 2001) [10] و AISC [11] برای برآورد ظرفیت سیستم دیوار برشی فولادی پیشنهاد شده‌است. البته روش‌های دیگری نیز مانند روش اندرکنش- قاب- ورق (PFI) [12] و روش اصلاح‌شده‌ی اندرکنش- قاب- ورق(M-PFI) [13] نیز برای برآورد ظرفیت برشی این نوع سیستم‌ها ارائه شده‌است که به نظر مؤلفان از جهاتی مانند دقت بالاتر در محاسبه‌ی رفتار چندخطه‌ی سیستم و در نظر گرفتن اثر اندرکنشی قاب و ورق پرکننده دارای برتری نسبت به مدل نواری است. مؤلفان روابطی برای به‌دست آوردن رفتار چندخطه‌ی سیستم دیوار برشی تقویت‌شده با FRP براساس این دو روش توسعه و پیشنهاد داده‌اند [4].

آستانه و زاهو [14,15] مطالعات آزمایشگاهی بر روی دو نمونه از دیوار برشی فولادی کامپوزیتی سه‌طبقه، تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی انجام دادند. آنها نشان دادند که لایه‌ی بتنی توزیع تنش بهتری را در ورق جان ایجاد می‌کند و خطوط میدان‌های کششی را در ناحیه‌ی بیشتری توسعه می‌دهد. رهایی و حاتمی [16] به‌طور تحلیلی و آزمایشگاهی اثر فاصله‌ی گل‌میخ‌های برشی، صلبیت تیر میانی، و نوع اتصال تیر به ستون را در دیوارهای برشی فولادی کامپوزیتی مورد بررسی قرار دادند.

لوبل و همکاران [17] رفتار دو دیوار برشی فولادی یک طبقه و یک دیوار برشی چهارطبقه را به صورت آزمایشگاهی، تحت بارگذاری سیکلی مورد مطالعه قرار دادند و نتایج را با مدل تحلیلی مقایسه کردند و نشان دادند که ظرفیت بعد از کمانش را مدل تحلیلی به‌خوبی برآورد می‌کند، در حالی که برآورد سختی به روش تحلیلی با خطای نسبتاً زیادی همراه است. کسیس و همکاران [18] مطالعات آزمایشگاهی به‌منظور بررسی نسبت ضخامت ورق جان به بعد پانل و هم‌چنین نوع اتصال تیر به ستون انجام دادند و نشان دادند که مود شکست در هنگام استفاده از جان ضخیم‌تر به‌صورت ناپایداری در ستون است و اختلاف بین اتصال ساده و خمشی ناچیز است. درایور و همکاران [19] رفتار یک دیوار برشی فولادی چهار طبقه با جان لاغر تحت بارگذاری سیکلی را به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. علوی- ناطقی [۲۰] مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بر روی ترکیب سخت‌کننده‌های قطری با بازشوی استراتژیک در دیوار برشی فولادی انجام دادند و نتیجه گرفتند که این نوع سیستم دارای جذب انرژی بالا و رفتار لرزه‌ای مناسب می‌باشد. به‌علاوه آنها روابط نظری را برای تخمین ظرفیت دیوار برشی فولادی با شرایط مختلف لاغری و با توجه به نقش سختی اعضای مرزی ارائه کردند [21]. ویان و همکاران [22] رفتار دیوارهای برشی فولادی با اتصال RBS تیر به ستون مرکب با ورق پرکننده‌ی سوراخ‌دار جان تحت بارگذاری سیکلی را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. علی‌نیا [23,24] تأثیر اعضای مرزی در رفتار دیوارهای برشی با جان لاغر را به‌صورت تحلیلی مورد ارزیابی قرار داد و نشان داد که سختی اعضای مرزی در کمانش الاستیک برشی ورق جان و رفتار بعد از کمانش نقش خیلی کمی دارد.

مطالعه‌ی آزمایشگاهی

برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی تقویت شده با الیاف پلیمری شیشه تعدادی آزمایش بر روی یک مدل مقیاس شده انجام شده‌است. مدل آزمایشگاهی شامل یک پانل برشی یک‌طبقه، با اتصال مفصلی اعضای مرزی در چهار گوشه‌ی قاب و هم‌چنین اتصال پیچی اعضای مرزی به ورق پرکننده‌است. در مدل اول آزمایشگاهی از ورق پرکننده‌ی فولادی تقویت‌نشده استفاده شده‌است، در حالی که در چهار مدل بعدی آزمایشگاهی از ورق پرکننده‌ی فولادی تقویت‌شده با الیاف پلیمری شیشه با تعداد لایه‌های تقویتی متفاوت با چیدمان های متفاوت استفاده شده‌است. نمونه‌های مورد بررسی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی سیکلی در امتداد قطری براساس الگوی بارگذاری ATC-24 به‌وسیله‌ی جک‌های هیدرولیکی ۶۰۰kN قرار گرفته‌است. در ادامه به‌طور کامل رفتار این نوع سیستم‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

مدل‌های آزمایشگاهی و چیدمان آزمایش

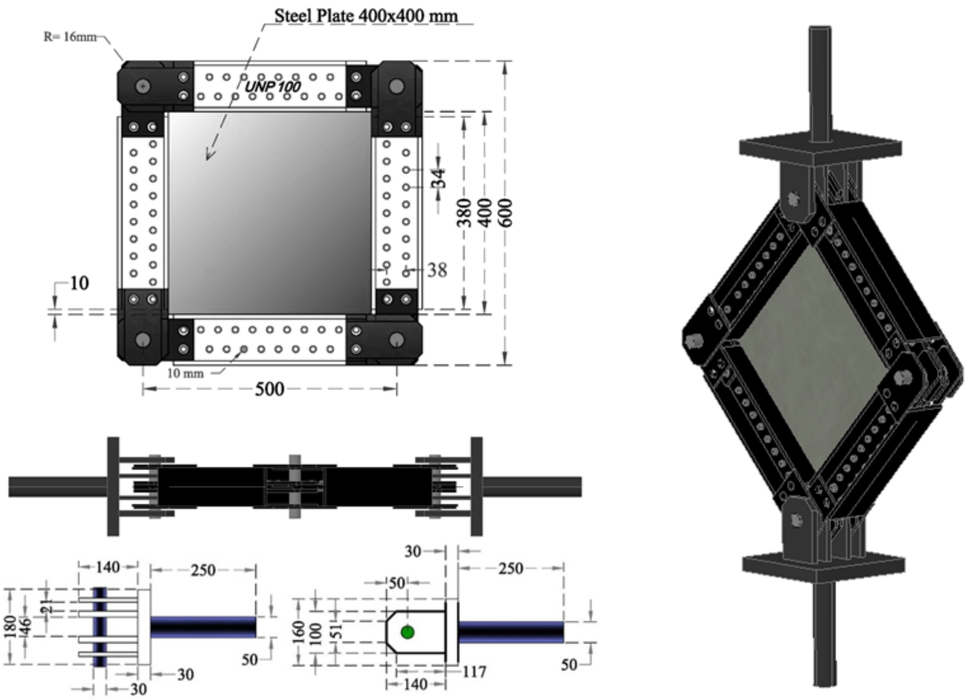
در این تحقیق تعدادی آزمایش بر روی دیوارهای برشی فولادی تقویت‌نشده و تقویت‌شده انجام شده‌است. مدل آزمایشگاهی شامل یک دیوار برشی فولادی یک‌طبقه، با اتصال مفصلی اعضای مرزی در چهارگوشه‌ی قاب و هم‌چنین اتصال پیچی اعضای مرزی به ورق پرکننده است. جزئیات اجزای تشکیل‌دهنده‌ی پانل برشی فولادی در شکل(۱) نشان داده شده‌است. اعضای مرزی این پانل برشی متشکل از چهار بازو و با طول یکسان و برابر با ۰/۶ متر است. هر بازو از دو پروفیل UNP100 که از قسمت جان توسط دو ردیف پیچ با مقاومت بالا با قطر ۱۰ میلی‌متر متصل می‌باشد، تشکیل شده‌است، به‌طوری‌که ورق پرکننده بین دو پروفیل قرار گرفته‌است و توسط پیچ‌ها به بازوها متصل می‌شود. اتصال این چهار بازو که تشکیل یک قاب مربعی شکل را می‌دهند، به‌صورت مفصلی انتخاب شده‌است. اتصال ورق جان به اعضای مرزی نیز توسط این دو ردیف پیچ صورت گرفته‌است و تقریباً به‌صورت گیردار عمل می‌کند. اعضای مرزی طوری طراحی شده‌اند که تمامی محدوده‌ی تغییرمکان‌ها همواره در ناحیه‌ی خطی قرار داشته باشد. هم‌چنین اعضای مرزی حداقل الزامات پیشنهادی در AISC 341-05 را برآورده می‌کند. هدف از انتخاب اعضای مفصلی، حذف اثر اندرکنشی اعضای مرزی با ورق پرکننده بوده‌است، و هم‌چنین بررسی تنها اثر نوع ورق پرکننده‌ی جان در رفتار سیستم‌های دیوار برشی تقویت‌شده و تقویت‌نشده‌است. در تمامی آزمایش‌ها، اعضای مرزی یکسان است.

در تمامی این پنج مدل آزمایشگاهی، ورق پرکننده‌ی جان به صورت مربعی شکل، با بعد ۰/۶ متر انتخاب شده‌است. تعدادی جابه‌جایی‌سنج و کرنش‌سنج نیز در نقاط حساس مورد نظر بر روی نمونه‌ها نصب گردید. در شکل (۲) نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه بارگذاری محوری (Roell-Amsler) برای انجام آزمایش‌ها نشان داده شده‌است.

مشخصات ورق پرکننده‌ی جان در مدل‌های مورد بررسی در جدول (۱) نشان داده شده‌است. در نمونه‌ی SPSP1، از ورق فولادی تقویت‌نشده به ضخامت ۰/۹mm به‌عنوان ورق پرکننده‌ی جان استفاده شده‌است. در مدل‌های بعدی، ورق پرکننده‌ی جان ۰/۹mm، با تعدادی لایه پلیمری GFRP با چیدمان متفاوت، مطابق شکل (۳) تقویت شده‌است.

الیاف پلیمری شیشه‌ی مورد استفاده برای ساخت ورق‌های کامپوزیتی، با نام تجاری SikaWrap-Hex-430G ساخت شرکت سیکا است. این نوع الیاف به صورت یک‌جهته می‌باشد. از چسب Sikadur-330، برای اتصال ورق‌های فولادی به لایه‌های پلیمری استفاده شده‌است. براساس داده‌های شرکت سازنده، ضخامت یک لایه الیاف پلیمری SikaWrap-Hex-430G با اپوکسی Sikadur-330، برابر ۰/۵۰۸mm است. در افزایش مقاومت ورق‌های کامپوزیتی، راستا قرارگیری الیاف نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. علت آن، مقاومت و سختی زیاد در راستای الیاف، و مقاومت

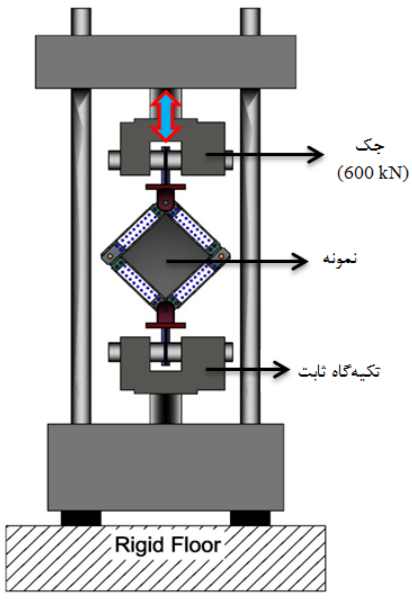
و سختی ناچیز در راستای عمود بر الیاف است. حالت بهینه‌ی استفاده از الیاف در صورتی است که راستای اصلی قرارگیری الیاف در راستی اعمال بار باشد. تغییر در راستای قرارگیری الیاف ممکن است به‌طور قابل‌توجهی ظرفیت سیستم را کاهش دهد.



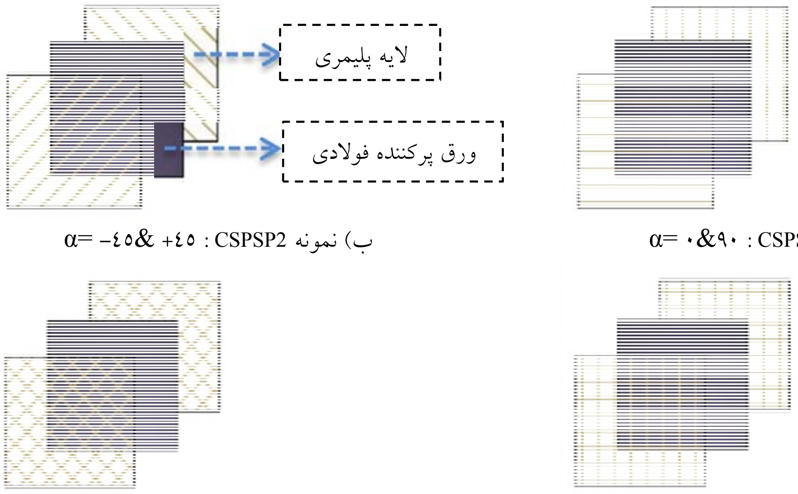
الف) نمای پانل برشی فولادی کامپوزیتی

ب) جزئیات دقیق پانل برشی فولادی کامپوزیتی

شکل ۱ جزئیات نمونه‌ی آزمایشگاهی



شکل ۲ چیدمان آزمایش(Test Set-up)



الف) نمونه CSPSP2 : α= ۰&۹۰

ب) نمونه CSPSP2 : ۴۵+ &۴۵- =α

الف) نمونه CSPSP4 : α=۰&۹۰

ب) نمونه CSPSP5 : ۴۵+&۴۵- =α

شکل ۳ حالت‌های مختلف تقویت ورق پرکننده‌ی فولادی با الیاف پلیمری در مدل‌های آزمایشگاهی

جدول ۱ مشخصات ورق پرکننده‌ی جان در نمونه‌های آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی	تعداد لایه در ورق پرکننده		ضخامت هر لایه در ورق پرکننده (mm)		ضخامت کل ورق کامپوزیتی پرکننده (mm)	زاویه‌ی قرارگیری لایه‌های پلیمری نسب به راستای افقی تیر	نوع الیاف پلیمری
	لایه‌ی فولادی	لایه‌ی پلیمری	ورق فولادی	لایه‌ی پلیمری			
SPSP1	۱	۰	۰٫۹	-	۰٫۹	-	-
CSPSP2	۱	۲	۰٫۹	۰٫۵۰۸	۱٫۹۱۶	۹۰ # ۰	SikaWrap-430G
CSPSP3	۱	۲	۰٫۹	۰٫۵۰۸	۱٫۹۱۶	۴۵ # -۴۵	SikaWrap-430G
CSPSP	۱	۴	۰٫۹	۰٫۵۰۸	۲٫۹۳۲	۹۰&۰ # ۹۰&۰	SikaWrap-430G
CSPSP5	۱	۴	۰٫۹	۰٫۵۰۸	۲٫۹۳۲	۴۵& -۴۵ # ۴۵&-۴۵	SikaWrap-430G

خصوصیات مکانیکی مصالح

برای به‌دست آوردن مشخصات دقیق مکانیکی از جمله رفتار تنش-کرنش مصالح، بر روی مصالح مصرفی در اعضای مرزی و همچنین ورق پرکننده آزمایش تست کشش (Test Coupon) براساس استاندارد ASTM-A370-05انجام شده‌است [25]. براساس این آزمایش‌ها، مقاومت تسلیم و مدول الاستیسیته ورق فولادی پرکننده‌ی جان به‌ترتیب برابر ۱۹۷ MPa و ۲۰۴ GPa به‌دست آمده‌است. برای اعضای مرزی (UNP-100) نیز این مقادیر به‌ترتیب برابر ۳۱۰ MPa و ۲۰۳ GPa به‌دست آمده‌است. کرنش گسیختگی برای ورق پرکننده‌ی جان و اعضای مرزی به‌ترتیب برابر با ۲۶ و ۱۹ در صد به‌د ست آمدها ست. خلا صه‌ی نتایج ت ست کشش در جدول (۲) ارائه شده‌است. الیاف پلیمری تقویت‌شده دارای رفتار تقریباً خطی تا گسیختگی نهایی است. براساس اطلاعات شرکت سازنده، مدول الاستیسیته و تنش گسیختگی یک لایه از الیاف SikaWrap-Hex-430G با اپوکسی Sikadur 330 در راستای طولی الیاف به‌ترتیب برابر با ۲۶/۴۹ MPa و ۵۳۷ MPa ا ست. این مقادیر در جهت عمود بر را ستی طولی الیاف به‌ترتیب برابر با ۷/۰۷ MPa و ۲۳ MPa است. کرنش گسیختگی در راستای طولی و عرضی الیاف به‌ترتیب برابر با ۲/۲٪ و ۰/۴۶٪ می‌باشد. به‌طور خلاصه در جدول (۳) مشخصات مکانیکی لایه‌ی

کامپوزیتی ارائه شده‌است.

بارگذاری

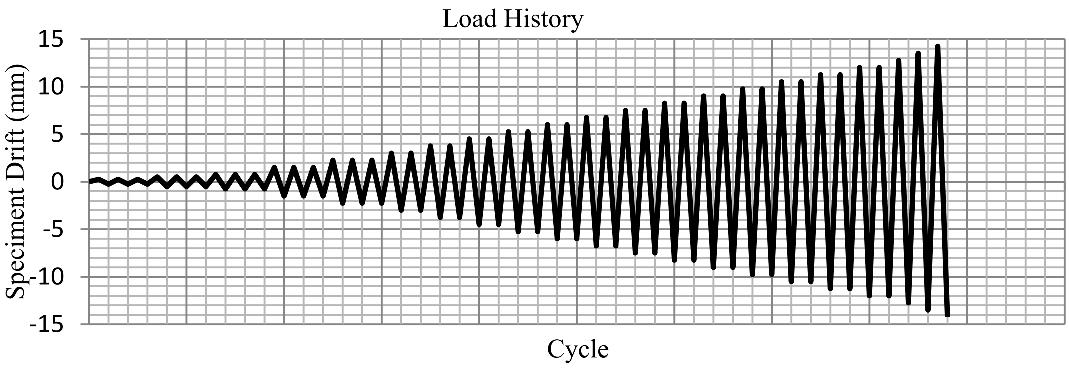
تمامی نمونه‌ها تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی سیکلی در امتداد قطری خود، مطابق شکل (۲) قرار گرفتند. بارگذاری به‌صورت کنترل تغییر مکان و براساس پروتکل بارگذاری ATC-24 (1992) [26] از دامنه‌ی کوچک بارگذاری تا شکست نمونه‌ها ادامه پیدا کرد. پروتکل بارگذاری یکسانی که بر روی تمامی نمونه‌ها اعمال شده‌است، در شکل (٤) نشان داده شده‌است. برای به‌دست آوردن پروتکل بارگذاری نیاز به مقدار تغییرمکان تسلیم نمونه‌ها بوده‌است و این مقدار با استفاده از تحلیل المان محدود با برنامه‌ی ANSYS به‌دست آمده‌است. المان مورد استفاده برای مدل‌سازی اعضای مرزی و ورق فولادی از نوع پوسته‌ی ۱۸۱ (Shell-181) است. این المان چهار گرهی است که هر گره آن دارای ۳ درجه آزادی انتقالی و ۳ درجه آزادی دورانی است و برای مدل‌سازی ورق‌ها و پوسته‌ها مناسب است. برای ایجاد مفصل خمشی در اعضای بازویی از دو المان MPC184 و COMBIN7 به‌طور ترکیبی استفاده شده‌است. با توجه به در دست داشتن نتایج تست کشش برای فولاد مصرفی در آزمایش، رفتار مصالح استفاده‌شده در قاب و ورق پرکننده در مدل المان محدود به‌صورت رفتار خمیری سخت‌شونده سینماتیک و به صورت مستقل از سرعت مدل سازی گردید. در این نوع رفتار از مدل بسلینگ استفاده می‌شود و اثر بوشینگر در نظر گرفته می‌شود. نوع تحلیل انجام شده در این تحقیق از نوع تحلیل غیرخطی با تغییر مکان‌های بزرگ و با اعمال نقص اولیه براساس مود اول کمانش بوده‌است. نوع بارگذاری وارد بر سازه به‌صورت کنترل- تغییر مکان و به‌صورت بارافزا صورت گرفته‌است. اعمال بار در امتداد قطری نمونه‌ها و مشابه با شرایط آزمایشگاه صورت گرفته‌است. منحنی نیرو- تغییرمکان این نمونه در شکل (۵) نشان داده شده‌است. در شکل (٦) وضعیت تنش‌های وان- میسز و تغییر مکان‌های خارج از صفحه‌ی پانل برشی فولادی نشان داده شده‌است.

جدول ۲ خصوصیات مکانیکی مصالح مصرفی فولادی

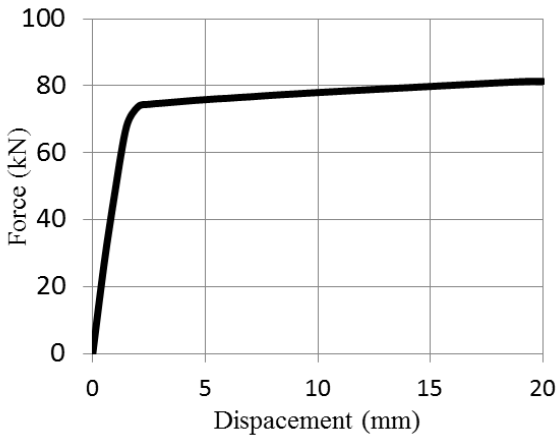
نوع مصالح	مدول الاستیسیته GPa	تنش تسلیم MPa	کرنش تسلیم %	تنش نهایی MPa	کرنش حد نهایی %	کرنش گسیختگی %
ورق با ضخامت ۰٫۹ میلی‌متر	۲۰٤	۱۹۷	۰/۰۹۷	۳۲۳/۲	۲۵	۲٦
ناودانی ۱۰۰	۲۰۳	۳۱۰	۰/۲۳	٤٦۰/۵	۱۸	۱۹

جدول ۳ مشخصات مکانیکی لایه‌ی کامپوزیتی تقویتی

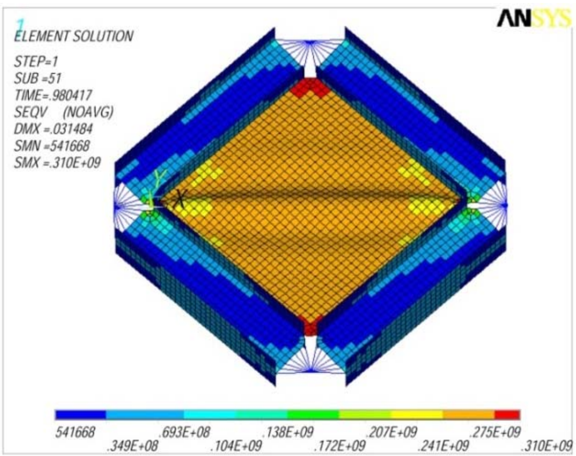
نوع لایه‌ی کامپوزیتی	مدول الاستیسیته‌ی کششی		مقاومت کششی نهایی	
	EY (GPa)	EX (GPa)	TY (MPa)	TX (MPa)
الیاف پلیمری SikaWrap-Hex-430G با اپوکسی Sikadur 330	۷/۰۷	۲٦/٤۹	۲۳	۵۳۷



شکل ٤ پروتکل بارگذاری بر روی نمونه‌های مورد بررسی براساس ATC-24



شکل ٥ نمودار نیرو- تغییرمکان نمونه SPSP1

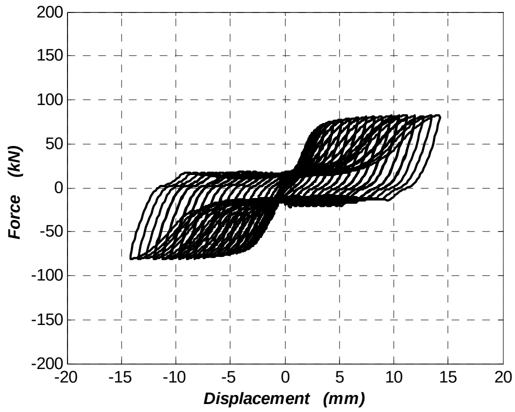


شکل ٦ وضعیت تنش‌های وان- میزز در نمونه SPSP1

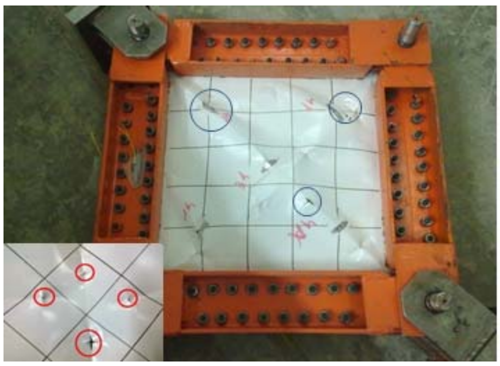
تفسیر نتایج

نمونه SPSP1. منحنی هیسترزیس نمونه‌ی SPSP1 در شکل (٧) نشان داده شده‌است. رفتار نمونه در مراحل اول بارگذاری به‌صورت خطی بوده و در جابه‌جایی نسبی ٠/٤٢٪ در ورق جان کمانش الاستیک قابل مشاهده بوده‌است. بعد از تسلیم ورق پرکننده تحت

میدان‌های کششی قطری ظرفیت سیستم تقریباً ثابت و برابر با ۸۲/۵۸ kN به‌دست آمده‌است. طی بارگذاری پارگی‌هایی در ورق جان در جابه‌جایی‌های نسبتاً زیاد به‌صورت موضعی رخ داده‌است که در شکل (۸) نشان داده شده‌است. همان‌طور که منحنی هیسترزیس این نمونه نشان می‌دهد، این گسیختگی‌های موضعی تأثیری در کاهش مقاومت برشی پانل نداشته‌اند.

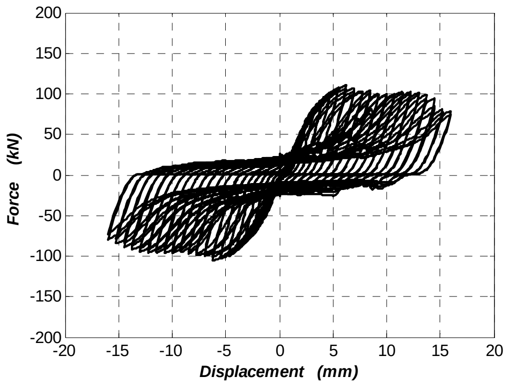


شکل ۷ منحنی هیسترزیس نمونه‌ی SPSP1

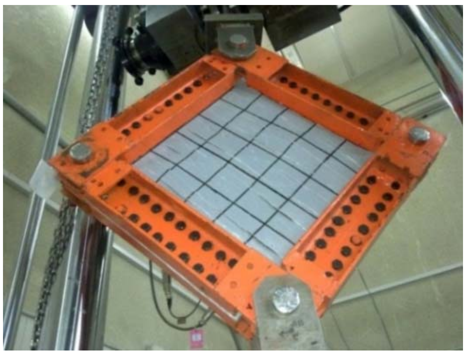


شکل ۸ پارگی‌های موضعی در ورق پرکننده‌ی جان

نمو نه‌ی CSPSP2. منحنی هیسترزیس نمونه‌ی CSPSP2 در شکل (۹) نشان داده شدهاست. در این نمونه ورق پرکننده‌ی فولادی جان با دو لایه‌ی پلیمری تقویت شده‌است. تا جابه‌جایی ۳ mm رفتار نمونه تقریباً به‌صورت خطی بود و در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر از ۵/۲۵ mm (۰/۷۵٪) کمانش در ورق جان اتفاق افتاد. در جابه‌جایی ۷ mm ظرفیت سیستم به ۱۲۰ kN رسید. در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر از ۸ mm، گسیختگی‌های موضعی در لایه‌ی تقویتی پلیمری توسعه پیدا کرد و به‌تدریج از ظرفیت سیستم کاسته‌شد. پارگی‌ها در لایه پلیمری، در راستای عمود بر امتداد اصلی الیاف رخ داد و با رشد این پارگی‌ها جداشدگی بین باند لایه‌ی فولادی و پلیمری اتفاق افتاد (شکل ۱۰). تا جابه‌جایی ۱۵ mm ظرفیت سیستم در حدود ۱۰۰ kN باقی ماند و در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر با رشد گسیختگی‌ها، این مقدار به ۸۰ kN رسید که تقریباً برابر با ظرفیت نمونه‌ی تقویت نشده‌است.



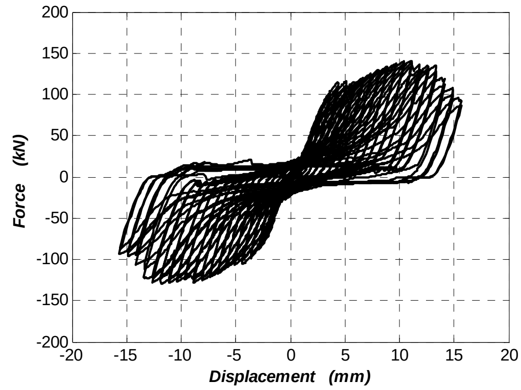
شکل ۹ منحنی هیسترزیس نمونه‌ی CSPSP2



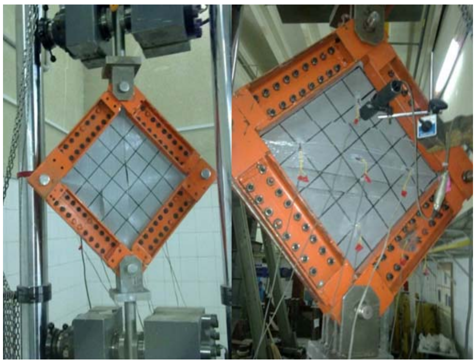
شکل ۱۰ پدیده‌ی لایه- لایه شدن و پارگی در لایه‌ی پلیمری در نمونه‌ی CSPSP2

نمو نه‌ی CSPSP3. منحنی هیسترزیس نمونه‌ی CSPSP3 در شکل (۱۱) نشان داده‌شده‌است. رفتار نمونه در مراحل اول بارگذاری به‌صورت خطی بود و در جابه‌جایی نسبی ۰/۷۲٪ در ورق جان کمانش الاستیک مشاهده شد. بعد از تسلیم لایه‌ی فولادی ورق جان که در جابه‌جایی ٤/٤ mm تقریباً رخ داد، کماکان رفتار سیستم حالت سخت شونده داشت. این اضافه مقاومت توسط لایه‌های پلیمری تأمین شده‌بود. بعد از جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر از ٦/٥ mm، پارگی‌هایی در

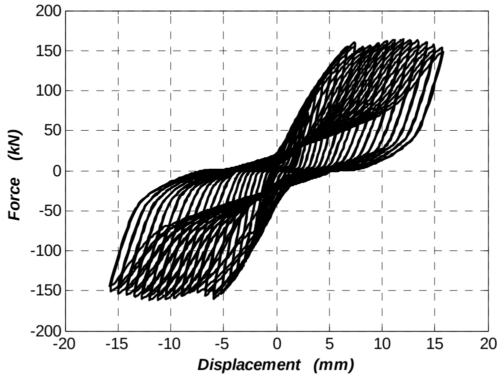
راستای عمود بر راستای طولی الیاف شروع به شکل‌گیری کرد. تا جابه‌جایی ۱۳/۵ میلی‌متر رفتار نمونه حالت سخت‌شونده داشت و در این جابه‌جایی ظرفیت سیستم به حدود ۱٤۰/۸ kN رسید. در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر، به‌علت رشد پارگی، لایه‌لایه شدن و هم‌چنین جداشدگی لایه‌ی پلیمری (مطابق شکل ۱۲)، ظرفیت سیستم کاهش یافت.



شکل ۱۱ منحنی هیسترزیس نمونه‌ی CSPSP3


شکل ۱۲ پدیده‌ی لایه- لایه شدن و پارگی در لایه‌ی پلیمری نمونه‌ی CSPSP3

نمونه‌ی CSPSP4. نتایج آزمایش بر روی دو نمونه‌ی CSPSP2 و CSPSP3 نشان داد که یکی از مودهای خرابی در این نوع سیستم، گسیختگی و لایه-لایه شدن الیاف در راستای ضعیف ورق‌های GFRP است. با توجه به این مسئله و جلوگیری از این مود گسیختگی، در نمونه‌ی CSPSP4، ورق پرکننده‌ی فولادی با دو لایه‌ی عمود برهم از الیاف پلیمری شیشه‌ی تقویت شده‌است. در این مدل راستای اصلی لایه‌های پلیمری با راستای میدان‌های کششی، زاویه‌های ٤۵ درجه می سازد. در این مدل ضخامت ورق پرکننده ۰/۹ میلی‌متر است و در هر طرف ۲ لایه‌ی پلیمری قراردارد. منحنی هیسترزیس نمونه‌ی CSPSP3 در شکل (۱۳) نشان داده شده‌است. کمانش الاستیک در این نمونه در ورق جان در تغییرمکان نسبی ۰/۷۵٪ رخ داده‌است. ظرفیت نمونه در جابه‌جایی ۷mm به kN ۱۶۵/۶رسید و در تغییرمکان‌های بزرگ‌تر، تقریباً این مقدار ثابت باقی ماند. در این نمونه برخلاف دو نمونه‌ی تقویت شده‌ی پیشین، هیچ‌گونه پدیده‌ی پارگی و لایه-لایه شدن در لایه‌ی پلیمری مشاهده نشد (شکل ١٤).

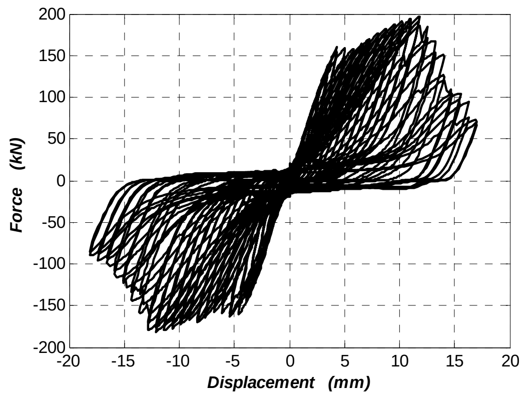


شکل ۱۳ منحنی هیسترزیس نمونه‌ی CSPSP4

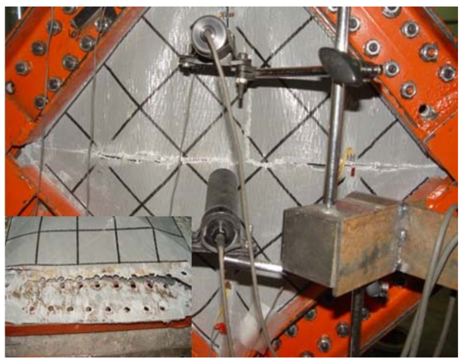

شکل ١٤ عدم مشاهده‌ی پدیده‌ی لایه- لایه شدن و پارگی در لایه‌ی پلیمری نمونه‌ی CSPSP4 (وضعیت نمونه در تغییرمکان نسبی ۲٪)

نمونه‌ی CSPSP5. در این نمونه ورق فولادی پرکننده‌ی جان از هر طرف با دو لایه از الیاف پلیمری عمود بر هم در هر طرف تقویت‌شده‌است. راستای قرارگیری طولی الیاف در راستای میدان‌های کششی قرار گرفته‌است. منحنی هیسترزیس نمونه‌ی CSPSP5

در شکل (۱۵) نشان داده‌شده‌است. کمانش الاستیک در این نمونه در ورق جان در تغییرمکان نسبی بزرگ‌تر از ٪۰/۷ رخ داده‌است. رفتار نمونه تا جابه‌جایی 5mm تقریباً خطی بوده‌است. در جابه‌جایی 5mm ظرفیت نمونه به ۱۶۰ kN رسید. در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر سختی سیستم کاهش یافت و رفتار سخت شونده‌ی نمونه تا جابه‌جایی ۱۲mm (٪۱/۷) ادامه داشت. در این تغییرمکان ظرفیت سیستم به ۱۸۰/۵ kN رسید. از این لحظه به بعد گسیختگی در لایه‌ی پلیمری در راستای میدان‌های کششی و به‌صورت قطری و هم‌چنین گسیختگی در محل اتصال ورق کامپوزیتی به اعضای مرزی مطابق با شکل (۱۶) رخ داد. از این لحظه به بعد از ظرفیت نمونه به‌سرعت با افزایش تغییر مکان کاسته‌شد و در مراحل پایانی بارگذاری ظرفیت نمونه به ۷۵ kN رسید.



شکل ۱۵ منحنی هیسترزیس نمونه‌ی CSPSP5



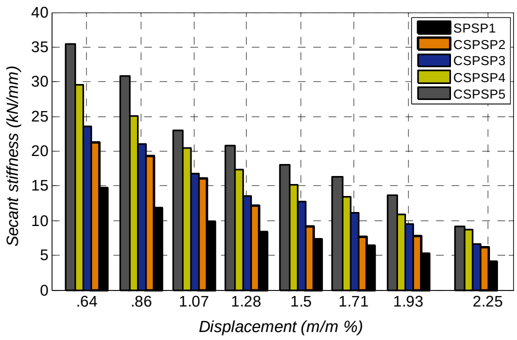
شکل ۱۶ گسیختگی اتصال ورق کامپوزیتی به اعضای مرزی و پارگی لایه‌ی پلیمری در امتداد قطری در نمونه‌ی CSPSP5

بررسی پارامترهای مهم لرزه‌ای سیستم. الف) سختی و مقاومت برشی. در جدول (٤) مقدار سختی، مقاومت تسلیم و نهایی نمونه‌های مورد بررسی براساس منحنی‌های هیسترزیس آزمایشگاهی نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با اضافه کردن لایه‌ی کامپوزیتی سختی تمام نمونه‌ها افزایش پیدا کرده‌است. در نمونه‌های CSPSP2 و CSPSP3 که ورق پرکننده‌ی جان با دو لایه‌ی پلیمری تقویت‌شده است، مقدار سختی به‌ترتیب به میزان ۱۰ و ۳۹ درصد افزایش پیدا کرده‌است. بر این اساس اگر راستای الیاف موازی با میدان‌های کششی باشد میزان افزایش سختی سیستم تا میزان ۲۹ درصد نسبت به حالت دیگر قابل افزایش است. در نمونه‌های CSPSP4 و CSPSP5 که ورق پرکننده‌ی جان با چهار لایه‌ی پلیمری تقویت شده‌است، میزان سختی به‌ترتیب به میزان ٣٤ و ٥٩ درصد افزایش کرده است. در این حالت نیز با قرارگیری الیاف راستای الیاف پلیمری شیشه در راستای میدان‌های کششی مقدار سختی به میزان ٢٤ درصد افزایش پیدا کرده‌است. نتایج نشان می‌دهد که اگر راستای اصلی الیاف پلیمری در راستای میدان‌های کششی باشد میزان سختی در سیستم به بیشترین مقدار ممکن می‌رسد. مقاومت تسلیم و نهایی نیز در نمونه‌های تقویت شده افزایش پیدا کرده‌است. مقاومت نهایی در نمونه‌های CSPSP2، CSPSP3، CSPSP4 و CSPSP5 به‌ترتیب به میزان ٢٤، ٧١، ١٠١ و ١٢٠ درصد افزایش پیدا کرده‌است. بر این اساس مشاهده می‌شود که ظرفیت نهایی نمونه‌ها با افزایش تعداد لایه افزایش پیدا می‌کند. از طرف دیگر نتایج نشان می‌دهد که مقاومت نهایی نمونه‌ها تحت تأثیر مستقیم راستای قرارگیری لایه‌های پلیمری نسبت به میدان‌های کششی است. بر این اساس اگر راستای قرارگیری الیاف در راستای میدان‌های کششی باشد میزان مقاومت نهایی نیز در سیستم به بیشترین مقدار ممکن می‌رسد.

جدول ٤ مقایسه‌ی مقدار سختی، مقاومت تسلیم و نهایی نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه	سختی kN/m	سختی نسبی (kN/m)/(kN/m)	مقاومت تسلیم kN	مقاومت تسلیم نسبی kN/kN	مقاومت نهایی kN	مقاومت نهایی نسبی kN/kN
SPSP1	٢٦١١٥	١	٧٢/٨٨	١	٨٢/٥٨	١
CSPSP2	٢٨٦٦٧	١/١	١٠٠/٥	١/٣٨	١٠٢/٣	١/٢٤
CSPSP3	٣٦٣٢٥	١/٣٩	١١٥	١/٥٨	١٤٠/٨	١/٧١
CSPSP4	٣٤٩٨١	١/٣٤	١٦٠/٧	٢/٢	١٦٥/٦	٢/٠١
CSPSP5	٤١٦٥٢	١/٥٩	١٦٠	٢/٢	١٨٢	٢/٢

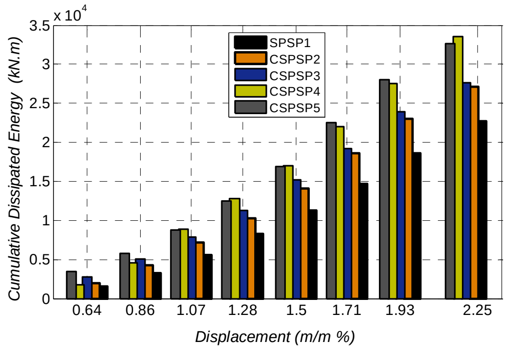
ب) سختی سکانت. در شکل(۱۷) روند تغییرات سختی سکانت برای نمونه‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه در تغییرمکان‌های نسبی مختلف بارگذاری نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که در تمام نمونه‌ها با افزایش دامنه‌ی بارگذاری سختی سکانت سیستم کاهش می‌یابد. در تمام نمونه‌های تقویت شده میزان سختی سکانت سیستم نسبت به نمونه‌ی تقویت‌نشده بیشتر است. در تغییرمکان نسبی ٪۲ سختی سکانت در نمونه‌های CSPSP2، CSPSP3، CSPSP4 و CSPSP5 به‌ترتیب به میزان ٤٨، ٨١، ١٠٠ و ١٦٠ درصد نسبت به نمونه‌ی SPSP1 افزایش پیدا کرده‌است. همان‌طور که مشاهده می شود در بین نمونه‌ها، نمونه‌هایی که با چهار لایه‌ی GFRP تقویت شده‌اند نسبت به تقویت با دو لایه‌ی GFRP تقویت‌شده، دارای سختی سکانت بیشتری هستند. از بین نمونه‌های CSPSP2، CSPSP3 که در آنها تقویت با دو لایه‌ی GFRP صورت گرفته‌است، نمونه‌ی CSPSP3 که در آن راستای قرارگیری الیاف در راستای میدان‌های کششی بوده‌است سختی سکانت بیشتری دارد. هم‌چنین از بین نمونه‌های CSPSP4 و CSPSP5 که تقویت با چهار لایه‌ی GFRP صورت گرفته‌است، نمونه‌ی CSPSP5 که در آن راستای قرارگیری الیاف در راستای میدان‌های کششی بوده‌است سکانت بیشتری دارد. بر این اساس اگر راستای قرارگیری الیاف در راستای میدان‌های کششی باشد میزان سختی سکانت سیستم به بیشترین مقدار ممکن می‌رسد.



شکل ۱۷ سختی سکانت نمونه‌ی آزمایشگاهی

پ) میزان انرژی مستهلک شده‌ی تجمعی. میزان انرژی مستهلک شده‌ی تجمعی برای نمونه‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه در تغییرمکان‌های نسبی مختلف بارگذاری در شکل (۱۸) نشان داده شده‌است. در چرخه‌های اول بارگذاری به‌علت این‌که هنوز نمونه‌ها در محدوده‌ی ناحیه‌ی الاستیک هستند، میزان انرژی مستهلک‌شده ناچیز می‌باشد. با افزایش بارگذاری و ورود پانل به ناحیه‌ی غیرخطی میزان انرژی جذب‌شده در سیکل‌هایی با دامنه‌ی بیشتر افزایش یافته‌است. همان‌طور که از شکل (۱۸) مشاهده می شود تقویت سیستم‌های مورد بررسی باعث افزایش میزان انرژی مستهلک‌شده‌ی تجمعی نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی شده‌است. در تغییرمکان نسبی ٪۲ میزان انرژی مستهلک‌شده‌ی تجمعی در نمونه‌های CSPSP2، CSPSP3، CSPSP4 و CSPSP5 به‌ترتیب به‌میزان ٢٤، ٢٨، ٤٨ و ٥٠ درصد نسبت به نمونه‌ی SPSP1 افزایش پیدا کرده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان جذب انرژی در نمونه‌های CSPSP2، CSPSP3 و نمونه‌های CSPSP4

و CSPSP5 به‌هم نزدیک است و تغییر راستای قرارگیری لایه‌های پلیمری تقویت‌شده نسبت به میدان‌های کششی تأثیر زیادی بر میزان جذب انرژی سیستم ندارد و میزان جذب انرژی نزدیک به‌هم است و تنها به تعداد لایه‌های کامپوزیتی بستگی دارد. در بین نمونه‌های مورد بررسی، نمونه‌هایی که با چهار لایه از الیاف GFRP تقویت شده‌اند نسبت به نمونه‌هایی با دو لایه‌ی GFRP تقویت‌شده مقدار بیشتری از انرژی را مستهلک کرده‌اند.



شکل ۱۸ انرژی مستهلک شده‌ی تجمعی نمونه‌ی آزمایشگاهی

ت) مودهای شکست در باند بین لایه‌ی پلیمری GFRP و ورق فولادی. مودهای شکست در باند بین لایه‌ی پلیمری GFRP و ورق فولادی در نمونه‌های مورد بررسی به شرح زیر است:

۱- تقویت با یک لایه‌ی پلیمری در هر طرف (نمونه‌ی CSPSP2 و CSPSP3):
- پارگی در راستای ضعیف الیاف در هر طرف.
- پدیده‌ی لایه-لایه شدن در لایه‌ی پلیمری.
- جداشدگی باند بین لایه‌ی پلیمری و فولادی.

۲- تقویت با دو لایه‌ی پلیمری در هر طرف (نمونه‌ی CSPSP4 و CSPSP5):
- جداشدگی باند بین لایه‌ی پلیمری و فولادی.
- شکست اتصال ورق به اعضای مرزی (فقط در نمونه‌ی CSPSP5).
- گسیختگی در راستای اصلی الیاف در تغییرمکان‌های نسبی بزرگ (فقط در نمونه‌ی CSPSP5).

نتیجه‌گیری

در این مقاله به‌صورت آزمایشگاهی رفتار دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده با الیاف پلیمری مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر استفاده از ورق پرکننده‌ی کامپوزیتی در رفتار لرزه‌ای سیستم دیوارهای برشی فولادی مورد مطالعه قرارگرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل، به‌طور خلاصه به شرح زیر است:

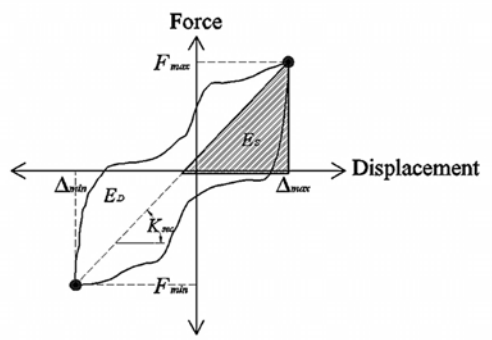
۱- تمامی نمونه‌های مورد بررسی دارای رفتار هیسترزیس مطلوب هستند.

۲- سیستم‌های تقویت‌شده نسبت به سیستم تقویت‌نشده دارای سختی و مقاومت به‌مراتب بیشتری هستند. با افزایش لایه‌های پلیمری این مقادیر افزایش پیدا می‌کنند. راستای قرارگیری الیاف نسبت به میدان‌های کششی از پارامترهای مهم تغییر این پارامترها است؛ به‌نوعی که اگر راستای قرارگیری الیاف در راستای میدان‌های کششی باشد، این مقادیر به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسند.

۳- میزان انرژی مستهلک شده‌ی نمونه‌ها در نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌ی تقویت‌نشده افزایش یافته‌است. تغییر راستای قرارگیری لایه‌های پلیمری تقویت‌شده نسبت به میدان‌های کششی تأثیر زیادی بر میزان جذب انرژی سیستم ندارد و میزان جذب انرژی نزدیک به‌هم است و بیشتر به تعداد لایه‌های کامپوزیتی بستگی دارد.

٤- با تقویت ورق پرکننده‌ی جان با دو لایه‌ی عمود بر هم پلیمری در هر طرف، می‌توان از مود شکست ترد مانند لایه- لایه شدن لایه‌ی پلیمری جلوگیری کرد.

۵- راستای قرارگیری الیاف نسبت به میدان‌های کششی یک پارامتر مهم در رفتار لرزه‌ای این نوع سیستم‌ها است.



شکل ۱۹ یک حلقه از منحنی چرخه‌ای

تشکر و قدر دانی

این تحقیق با اســـتفاده از کمک‌های مالی پژوهشـــگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و شرکت سیکا پار سیان در سال ۱۳۸۹ صورت گرفتها ست. انجام این تحقیق میســـر نبود مگر با همکاری اعضـــای گروه آزمایشگاه سازه و گروه پژوهشکده‌ی مهندسی سازه و آقای دکتر عرفان علوی. از همکاری‌های صـــمیمانه‌ی مهندس محمدمهدی قانع نیز در ســـاخت نمونه‌ی آزمایشگاهی تقدیر می‌گردد.

پیوست

الف) سختی سکانت

$$K_{sec} = \frac{\Delta F}{\Delta L} = \frac{F_{max} - F_{min}}{\Delta_{max} - \Delta_{min}} \quad (۱)$$

ب) ضریب میرایی ویسکوز معادل (ζ_{hyst})

$$\zeta_{hyst} = \frac{1}{4\pi}\left(\frac{E_D}{E_S}\right) \quad (۲)$$

پ) E_D: سطح زیر نمودار در هر چرخه

$$Es = \frac{1}{8}(F_{max} - F_{min}) \times (\Delta_{max} - \Delta_{min}) \quad (۳)$$

مراجع

1. Astaneh – Asl, A., "Seismic behaviour and design of steel shear walls", Steel TIPS Report, Structural Steel Educational Council, Moraga, CA, (2001).
2. Sabelli, R., Bruneau, M., "Design guide 20: steel plate shear walls", American Institute of Steel Construction. Chicago, IL, USA. (2007).
3. Zhao, X-L., Zhang, L., "State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures", Engineering Structures; Vol. 29, PP.1808–23, (2007).
4. Khazaei-Poul, M., Natghi-Alahi, F., "Behavior of strengthened steel plate shear wall by FRP laminate", M.Sc. Thesis. International Institute Of Earthquake Engineering and Seismology, Iran, December; (2011).
5. Wagner, H., "Flat sheet metal girders with very thin webs", Part I, General theories and assumptions, Tech Memo, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington D. C., No. 604, (1931).
6. Thorburn, L.J., Kulak, G.L., Montgomery, C.J., "Analysis of steel plate shear walls", Structural engineering report 107, Edmonton (Alberta, Canada): Department,(1983).
7. Timler, P.A., Kulak, G.L., "Experimental study of steel plate shear walls", Structural Engineering Report, University of Alberta, Canada, No. 114, (1983).
8. Elgaaly, M., "Thin steel plate shear walls behavior and analysis", Thin walled. Structures, Vol. 32, PP.151-180, (1998).
9. Berman, J.W., Bruneau, M., "Plastic analysis and design of steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering.* Vol. 129, PP. 1148–1156, (2003).
10. CAN/CSA S16-2001, "Limit state design of steel structures", Canadian Standards Association, Willowdale, ON., Canada. (2001).
11. AISC, "Specifications for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL., USA, (2005b).
12. Sabouri-Ghomi, S., Ventura, C., Kharrazi, H.K., "Shear analysis and design of ductile steel plate

walls", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 6, June 1, (2005).

13. Kharrazi, MHK., "Rational method for analysis and design of steel plate walls", Ph.D. dissertation. Vancouver (Canada): University of British Columbia, (2005).
14. Astaneh-Asl, A., "Seismic studies of innovative and traditional composite shear walls", Research project in-progress, Dept of Civil and Env Engineering: Univ. of California, Berkeley, (1998-2000).
15. Astaneh-Asl, A., "Cyclic tests of steel shear walls", Research project. Berkeley: Dept. of Civil and Env Engineering, Univ of California, (2001).
16. Rahai, A., Hatami, F., "Evaluation of composite shear wall behavior under cyclic loadings", *Journal of Constructional Stee,* Vol, 65(7), PP.1528–37, (2009).
17. Lubell, A. S., Prion, H. G. L., Ventura, C. E., Rezai, M., "Un-stiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 4, pp. 453-460, (2000).
18. Caccese, V., Elgaaly, M., Chen, R., "Experimental study of thin steel-plate shear walls under cyclic load", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 573-587, (1993).
19. Driver, R. G., Kulak, G. L., Kennedy, D. J. L., "Cyclic tests of four-story steel plate shear wall". *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 112-120, (1998).

۲۰. علوی، عرفان و ناطقی الهی، فریبرز، "مطالعه‌ی تحلیلی و آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده‌ی قطری"، رساله‌ی دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، (۱۳۸۹).

21. Nateghi, F., Alavi, E., "Theoretical seismic behaviour of steel plate shear walls", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, NO. 05. 050120, (2008).
22. Vian, D., Bruneau, M., Tsai, K. C., Lin, Y. C., "Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams, I: Experimental investigation", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, No. 3, March 1, (2009).
23. Alinia, M. M., "A study into optimization of stiffeners in plates subjected to in- plane shear loads", Thin-Walled Structures, Vol. 43(4), PP. 845_60, (2005).
24. Alinia, M. M., Dastfan, M., "Behaviour of thin steel plate shear walls regarding frame members", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, PP.730-8, (2006).
25. ASTM, A-370- 03, "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products", ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, (2006).
26. ATC., "Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures for buildings", Rep. No. ATC-24, Applied Technology Council, Redwood City, Calif, (1992).